

一种大型碳纤维复合材料桁架结构的设计与研制

王增加^{1,3} 刘建军^{1,3} 韩 笑^{1,3} 王希杰^{1,3} 李辅安^{1,2} 周玉玺^{1,3}

(1.西安康本材料有限公司,西安 710089;2.西安航天复合材料研究所,西安 710025;
3.高性能碳纤维制造及应用国家地方联合工程研究中心,西安 710025)

摘 要 从某临近空间浮空器的裙体复合材料桁架结构的需求出发,研发设计了一种大型环形碳纤维复合材料桁架结构,该桁架主体结构采用高性能碳纤维复合材料圆弧管,接头采用全复合材料设计,连接采用榫卯+粘结+螺栓连接的组合连接方式。同时,对复合材料圆弧管和接头的制造工艺进行了研究,研发制作了直径 4.5m、15m、30m 的裙体复合材料桁架结构,并配合完成 2 万 m 平流层试飞,获得圆满成功。该桁架产品的结构设计和复合材料制作工艺应用于某载人飞艇的复合材料骨架的设计和研制中,获得良好效果。

关键词 桁架,碳纤维复合材料,接头,成型工艺,通用航空器

Design and development of a large size CFRP truss structure

Wang Zengjia^{1,3} Liu Jianjun^{1,3} Han Xiao^{1,3} Wang Xijie^{1,3} Li Fuan^{1,2} Zhou Yuxi^{1,3}

(1.Xi'an Carbon Materials Co.,Ltd.,Xi'an 710089;2.Xi'an Aerospace Composites Institute,
Xi'an 710025;3.National and Local Union Engineering Research Center of
High-performance Carbon Fiber Manufacture and Application,Xi'an 710025)

Abstract From the requirement of the composite truss structure of a near space aerostat,R&D and design of a large annular CFRP truss structure were described.The main structure of truss used CFRP circular tube,the whole joint was CFRP.And the connection structure was compound of mortise and tenon,adhibited and bolt connection.At the same time,the production process of CFRP circular tube and joints were studied.And CFRP truss skirt structures with 4.5m,15m,and 30m diameter were developed,the stratospheric flight experiment of 20 thousand meters was successful completed.The design of truss frame structure and CFRP production process were applied to the development of a manned airship,and received good results.

Key words truss,carbon fiber reinforced plastics (CFRP),joint,production process,general aircra

桁架结构在浮空器、空间站和卫星中都是很有效的一种结构,由于结构简单,载荷分配合理,易于安装和拆卸的特点,它的应用前景很广泛。以往大多采用金属结构,质量大,降低了所能承受的有效载荷。高性能碳纤维复合材料具有比重小、比强度和比模量高、耐湿性能、耐疲劳性能和耐磨性好等综合优异特点,同时碳纤维复合材料又具有很好的可设计性能等。因此,用复合材料结构代替以往桁架结构中的铝合金、钛合金等金属材料,可以有效减轻航天器的结构质量,增加有效载荷,是当今航天新材料的研究重点和发展方向^[1-3]。

桁架结构和碳纤维复合材料具有诸多优势,使用碳纤维复合材料桁架结构已成为未来大型空间飞

行器支撑结构的重要发展趋势之一。我国在该领域起步较晚,相关参考文献较少,相关技术工艺还不成熟,已成为制约我国临近空间飞行器的瓶颈之一。本研究以某临近空间飞行器的裙体复合材料桁架结构为研究对象,从系统对质量和位置精度的要求出发,进行了从小到大多种直径规格裙体复合材料桁架结构的设计、分析和实验,应用 30m 直径桁架产品的某临近空间飞行器于 2015 年在新疆某基地进行 2 万 m 平流层试飞实验,获得圆满成功。浮空器的复合材料主体骨架结构在整个实验过程中状态稳定,各项性能和技术参数完全达标,为该浮空器的成功试飞提供了有力保障,为后续临近空间飞行器的研发奠定了良好基础。

1 实验部分

1.1 碳纤维复合材料桁架总体结构要求

(1)接头产品在纤维铺层平面内准各向同性设计与制作,圆弧杆做轴向增强;(2)杆件纵向拉伸强度 $>1200\text{MPa}$;(3)杆件弯曲拉伸模量 $>80\text{GPa}$;(4)杆件环向拉伸模量 $>20\text{GPa}$;(5)桁架总质量: $\phi 30\text{m}$ 桁架 $<200\text{kg}$ (其中复合材料质量约 180kg);(6)产品精度:圆弧管单管的曲率半径误差 $\leq \pm 10\text{mm}$ 。

组装成型后的桁架直径由于尺寸较大及本身刚性,带来的桁架直径较难测量,主要是与其他部件的配合。所以桁架本身需要在固化定位连接前进行修配,保证配合后再固化固定连接。

1.2 桁架结构设计

1.2.1 桁架设计

本研究的目标是一种应用于某临近空间软式浮空器的裙体复合材料桁架结构,大环直径 30m ,主要由2个大圆环连接组成,圆环之间距离 600mm ,大圆环由16段圆弧杆组成,圆弧管外径为 60mm ,壁厚 2mm ,上下共32段。其连接点设在三角支撑处。对于单独圆杆,中间再用两根直杆支撑,三角支撑处也为直杆。桁架整体结构设计模型见图1。

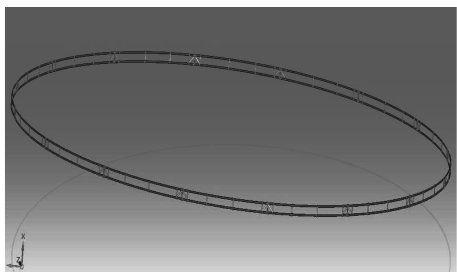


图1 桁架整体结构设计模型

1.2.2 接头设计

接头形式设计主要考虑圆弧杆的联接强度、连接面积、稳定性及刚性等。采用锥圆槽结构+粘结+螺栓连接结合的方式,结合圆弧杆的端头设计,实现接头连接的高强、稳定和可靠性。为了确保整体结构的刚性,接头采用整体设计,在拉伸方向做竖筋以加强连接处的刚性。圆管接头处内部添加质轻、刚性较大的填充体,以避免在接头压紧情况对圆弧管接头处的破坏,同时也防止榫接头在受较大拉力产生形变而从扣件中拔出。

整体式接头结构模型见图2。从图可以看出,接头为带锥度的锥圆槽结构,具有限位和防脱落作用,通过粘接和螺栓连接可将圆弧管高效、可靠地连接在一起。接头连接结构模型见图3。

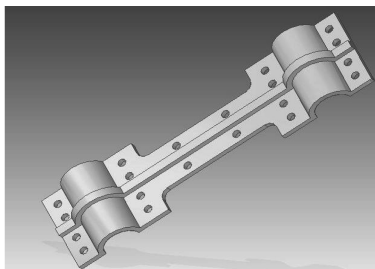


图2 整体式接头结构模型

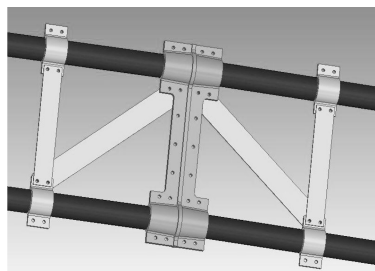


图3 接头连接结构模型

1.2.3 桁架的圆弧管设计要求

复合材料杆件按其断面一般有矩形、圆形和异型3种类型。矩形和圆形又分为有夹层和无夹层两类,无夹层的可称为层合杆件,有夹层的可称为夹层杆件。层合杆件纵向有较高的强度和刚度,但其横向的刚度较小,在横向荷载作用下容易产生较大的变形。夹层杆件采用轻质的芯材,强度和刚度大的复合材料层分布于杆件的外侧,因而杆件能获得较高的刚度,减小了杆件在横向荷载作用下的弯曲变形。夹层杆件中的芯材多为蜂窝、泡沫塑料和软木等轻质材料,不会因此而增加较大的质量,所以这种结构形式在工程中有很大的应用价值。在承受特别大的荷载时也可采用夹芯材料的组合杆。

异型型材杆件有闭合型和开口型两种。闭合型型材又称为薄壁杆件。杆件中可填充其他材料以增大型材的稳定性。所填充的材料可为轻质或非轻质材料如混凝土等。非闭合型型材的截面受稳定性限制,且不能承受正交荷载的作用,因而在应力复杂场合应用较少^[4-5]。

本研究的大型环形桁架结构的圆弧管由于具有较大的曲率,选用圆环形截面的层合杆件,该截面具有较大的截面惯性矩,因而杆件能获得较高的刚度,在受较大弯矩、受扭矩时,相对变形小,尺寸稳定性好。

1.2.4 预浸料铺层形式

为便于结构分析和理论估算,在进行铺层形式选择时一般选用 0° 、 $\pm 20^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 和 90° 组合铺层形

式。从满足力学性能的设计要求以及尺寸稳定性和工艺实施等因素,充分发挥增强材料的特性,铺层形式经分析及理论估算采用以下基本原则:(1)为了保证产品的后加工制孔,外观品质和铺层操作方便性,在产品的最外层以及最内层均采用 3K 平纹碳布预浸料;(2)根据不同部位的厚度要求,原则上均采用(0° 、 $\pm 20^{\circ}$ 、 $\pm 45^{\circ}$ 和 90°)交错铺层方式,每层层数根据设计计算^[6]。

1.3 复合材料桁架制作

1.3.1 原材料

圆弧杆、接头成型主要材料为 12K T700 级单向无纬布预浸料,该类型预浸料采用高韧性中温固化环氧树脂,耐高温、高强度/模量,可应用于承力结构件。预浸料质量、性能稳定,对产品的性能、品质和质量的稳定性和可靠性方面具有很大的优势,同时施工效率高、成本可有效控制^[7],其性能见表 1。连接螺栓采用高强螺栓,接头粘接采用常温固化粘接剂。

表 1 12K 单向碳纤维预浸料性能指标

名称	面密度/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	含量/%	0° 拉伸强度/MPa
性能指标	150	37	2200~2500
名称	0° 拉伸模量/GPa	0° 压缩强/MPa	0° 压缩模量/GPa
性能指标	120~130	1100~1300	120~130

1.3.2 复合材料圆弧管制备

纤维增强树脂基复合材料杆件加工一般采用手糊法、层压法、纤维缠绕法、编织法、拉挤法和传递模塑(RTM)法等。手糊法制备的杆件几何尺寸和力学性能离散性较大,已很少采用。层压法要求杆件的截面均匀,为方形或开口的型材。纤维缠绕法多用于圆形截面和旋转对称体。拉挤和编织工艺所得杆件的形状和性能稳定,是生产复合材料杆件较为流行的工艺,但拉挤杆件横向性能较弱,编织杆件的成本较高。树脂 RTM 工艺是在施加压力或(和)真空辅助条件下,将具有反应活性的低黏度树脂注入闭合模具,排出气体同时浸润干态纤维结构,最后在加热或者其他条件下发生交联反应完成固化。当然,RTM 工艺需要预先制作增强预制体,RTM 工艺所获得的制品尺寸精度高、表面品质好和整体性好^[8-9]。

本研究桁架所有圆弧管的成型采用一种新型复合材料成型方法,碳纤维预浸料模压+内充压成型,外模具由于尺寸较大(圆弧管长度 6m 左右),采用三段组合模具,电加热固化。内模采用聚苯乙烯泡

沫,外面包一层尼龙气袋,产品生产时将高性能碳纤维预浸料按设计铺层形式平整铺至于软式内模具上,将铺放好的预制体放置在外模具下腔,合上下外模,紧固,然后充压 1.0~1.1MPa,再加热保温保压使其固化成型,冷却后脱模获得制品。此工艺制备的复合材料制品尺寸精度高、重复性好和表面光洁,能一次成型结构复杂的制品。圆弧杆两端头带有锥度,锥度在圆弧杆成型后,用布带(或预浸料)在模具夹持下加压成型。

1.3.3 复合材料桁架接头制备

接头是复合材料桁架中最关键的部分,加工难度较大,性能不稳定,这也是影响复合材料桁架推广应用的主要原因之一。复合材料桁架的接头按所用材料可分为复合材料接头和金属节点两类。

(1)金属接头。金属接头是指接头采用金属制成,类似于钢桁架的接头,金属节点加工方便,实际刚度大、连接较可靠,所以应用也颇多。

(2)复合材料接头。复合材料接头是指除连接用螺栓外,接头完全采用复合材料制成。它有 3 种加工方式:①预制复合材料接头;②直接将各复合材料杆件以纤维包缠的方式连接在一起形成接头;③直接将复合材料杆件用螺栓或与其他连接件连在一起形成接头。用螺栓连接杆件形成的复合材料接头简化了设计程序,减小了结构的质量,也降低了制造的成本^[10-11]。

本研究桁架所有接头全部采用复合材料接头,采用模压成型工艺,连接组合式采用胶粘+螺栓机械紧固的方式。模压成型工艺是一种对热固性树脂和热塑性树脂都适用的纤维复合材料成型方法。其主要工艺过程:将定量的树脂与短切纤维的混合物(或者裁切好预浸料铺放好的产品模型)放入金属模具中,模具封闭后加热使树脂熔化,并在压力作用下充满模腔且均匀布满,模具上的流道孔可使的多余的胶液流出。最后形成与模腔相同形状的制品,再经过加热使树脂进一步发生交联反应而固化,再冷却使其硬化,脱模后得到复合材料制品。

2 结果与讨论

2015 年 9 月,应用 $\phi 30\text{m}$ 的碳纤维复合材料桁架作为骨架裙体的某近空间软式浮空器在我国新疆某基地进行 2 万 m 平流层试飞,获得圆满成功,碳纤维复合材料桁架在整个实验过程中状态稳定,各项技术参数完全达标,为该浮空器的成功试飞提供了有力保障。

某大型载人飞艇大型飞艇的筒舱碳纤维复合材料骨架及其接头采用了本研究的桁架结构设计,该飞艇艇体筒体外径 16m,总长 65m,整体筒舱、前后舱全部采用以碳纤维管材以及连接件为主构成的桁架结构。所采用圆弧管及接头的制作工艺应用了本研究的制作方法,取得了良好的效果。

3 结论

应用本研究制备的 $\phi 30\text{m}$ 碳纤维复合材料桁架为骨架裙体的近空间软式浮空器成功进行了 2 万 m 平流层试飞,获得圆满成功。研究结果表明:该近空间软式浮空器的材料、结构设计合理,制备方法新颖。

碳纤维复合材料桁架因性能优异,综合效益高,已逐步从尖端技术行业迈入资本投入较大的基础设施建设。根据其应用和研究现状,仍应加强以下几个方面的研究:(1)充分利用复合材料的可设计性,进一步加强复合材料的设计和分析,优化材料设计,降低材料成本;(2)改进提升生产工艺,改善复合材料的制作品质和提高生产效率;(3)从不同方面加强接头研究,研发出可靠、可行、性能稳定的复合材料桁架接头。

未来碳纤维复合材料大型桁架构件的设计开发技术、低成本制备技术和快速成型技术等将是实现

我国通用航空器结构设计和制造先进性的关键技术。

参考文献

- [1] 匡博洋,赵启林,陈立.复合材料桁架结构研究进展[C].重庆:中国土木工程学会 FRP 及工程应用专业委员会,2015.
- [2] 张雷,姚劲松.同轴空间相机碳纤维复合材料桁架结构的研制[J].光学精密工程,2012,20(9):1967-1973.
- [3] 章令晖,李甲申,等.航天器用复合材料桁架结构研究进展[J].纤维复合材料,2013(4):62-68.
- [4] 邵劲松,刘伟庆,蒋桐.民用工业中复合材料桁架的应用和发展[J].玻璃钢/复合材料,2006(5):35-40.
- [5] 肇研,孙沛.通用飞机与复合材料[J].航空制造技术,2011,57(20):34-37.
- [6] 唐见茂.我国碳纤维树脂基复合材料发展现状及前景展望[J].航天器环境工程,2010,27(3):269-280.
- [7] 赵稼祥.碳纤维复合材料在民用航空上的应用[J].高科技纤维与应用,2003,28(3):1-4.
- [8] 梁基照.聚合物基复合材料设计与加工[M].北京:机械工业出版社,2011,12-89.
- [9] 夏英伟,沃西源.先进复合材料桁架接头的研制与试验[J].航天返回与遥感,2006,25(3):49-54.
- [10] 陶国权,卫宇晨,吕明云,等.大型碳纤维桁架结构模态试验及特性[J].北京航空航天大学学报,2011,37(3):167-175.
- [11] Jane Gilby. Pultrusion provides roof solution[J]. Reinforced Plastics,1998,42(6):48-52.

收稿日期:2016-12-23

修稿日期:2018-03-08

(上接第 70 页)

参考文献

- [1] Wang N, Raza A, Si Y, et al. Tortuously structured polyvinyl chloride/polyurethane fibrous membranes for high-efficiency fine particulate filtration[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 398:240-246.
- [2] Mao X, Si Y, Chen Y, et al. Silica nanofibrous membranes with robust flexibility and thermal stability for high-efficiency fine particulate filtration[J]. RSC Advances, 2012, 2(32):12216-12223.
- [3] 李丽,王娇娜,李从举.静电纺 PA6/PET 复合膜的制备及其空气过滤性能[J].环境化学,2012,31(10):1575-1579.
- [4] Wang N, Si Y, Wang N, et al. Multilevel structured polyacrylonitrile/silica nanofibrous membranes for high-performance air filtration[J]. Separation and Purification Technology, 2014, 126:44-51.
- [5] Guo J, Zhou H, Akram M Y, et al. Characterization and application of chondroitin sulfate/polyvinyl alcohol nanofibres prepared by electrospinning[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 143:239.
- [6] 马利婵,王娇娜,李丽,等.静电纺空气过滤用 PET/CTS 抗菌复合纳米纤维膜的制备[J].高分子学报,2015(2):221-227.
- [7] Dehghan S F, Golbabaei F, Maddah B, et al. Optimization of

electrospinning parameters for PAN-MgONanofibers applied in air filtration[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2016, 66(9):912-921.

- [8] 乔家鑫,方泓钊,严玉蓉,等.聚醚砜的静电纺丝研究[J].合成纤维工业,2013,36(2):28-30.
- [9] Park S H, Ko Y S, Park S J, et al. Immobilization of silver nanoparticle-decorated silica particles on polyamide thin film composite membranes for antibacterial properties[J]. Journal of Membrane Science, 2015, 499:80-91.
- [10] Song X, Cheng G, Cheng B, et al. Electrospun polyacrylonitrile/magnetic Fe_3O_4 -polyhedral oligomeric silsesquioxanes nanocomposite fibers with enhanced filter performance for electrets filter media[J]. Journal of Materials Research, 2016, 31(17):1-10.
- [11] 段维维,王薇.NaA 型纳米沸石分子筛的研究进展[J].天津工业大学学报,2013,32(2):69-72.
- [12] 徐天堂,俞佳枫,徐恒泳.NaA 分子筛膜的研究进展[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,2014,30(1):40-46.
- [13] 徐国荣.基于纳米纤维的反渗透复合膜的制备及性能研究[D].北京:北京化工大学,2014.
- [14] 黄锐,齐昆.聚醚砜树脂的表征[J].塑料工业,1993(5):53-57.
- [15] 王前,李森,徐会君,等.单模聚焦微波辐射合成小粒径 NaA 分子筛及其抗菌性能[J].硅酸盐学报,2016,44(10):1451-1457.

收稿日期:2017-02-04

修稿日期:2018-01-11